

添加牛粪对长期不同施肥潮土有机碳矿化的影响及激发效应

戚瑞敏, 赵秉强, 李娟^{*}, 林治安, 李燕婷, 杨相东, 李志杰

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/农业部植物营养与肥料重点实验室, 北京 100081)

摘要: 为了探讨长期不同施肥潮土有机碳矿化对添加牛粪的响应特征及添加牛粪对长期不同施肥潮土有机碳矿化的激发效应, 以始建于 1986 年的长期定位试验为平台, 通过室内恒温培养的方法研究添加等氮量牛粪后长期不同施肥(不施肥, CK; 常量有机肥, SMA; 常量化肥, SMF; 常量有机无机配施, 1/2(SMA+SMF)) 潮土有机碳矿化、土壤有机碳及活性碳库组分(微生物量碳、可溶性有机碳、颗粒有机碳和易氧化有机碳)含量的变化特征。结果表明: 无论添加牛粪与否, 长期不同施肥潮土有机碳矿化过程均符合一级动力学方程, 而牛粪的添加显著增加了长期不施肥、长期单施化肥和长期有机无机配施土壤的有机碳矿化速率常数, 增长幅度分别为 21.74%、35.00% 和 45.00%; 添加牛粪提高了长期不同施肥潮土有机碳、微生物量碳、颗粒有机碳和易氧化有机碳含量, 却显著降低了可溶性有机碳含量; 牛粪对长期不施肥、长期施用常量有机肥、常量化肥和常量有机无机配施潮土有机碳矿化的正激发效应分别达到了 48.56%、3.60%、48.43% 和 3.92%, 且对长期不施肥及长期施用常量化肥潮土的激发效应显著高于对长期施用常量有机肥及长期有机无机配施土壤; 冗余分析显示添加牛粪对长期不同施肥土壤有机碳矿化的激发效应与土壤活性组分碳氮比呈正相关, 与土壤养分含量呈负相关。该研究不仅为合理施用有机肥和实现农田生态系统的可持续发展提供理论依据, 还有利于实现农业资源再利用及其效益最大化。

关键词: 有机碳; 化肥; 牛粪; 有机碳矿化; 激发效应

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.z2.016

中图分类号: S181

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-Supp.2-0118-10

戚瑞敏, 赵秉强, 李娟, 林治安, 李燕婷, 杨相东, 李志杰. 添加牛粪对长期不同施肥潮土有机碳矿化的影响及激发效应[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增刊 2): 118-127. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.z2.016

<http://www.tcsae.org>

Qi Ruimin, Zhao Bingqiang, Li Juan, Lin Zhian, Li Yanting, Yang Xiangdong, Li Zhijie. Effects of cattle manure addition on soil organic carbon mineralization and priming effects under long-term fertilization regimes[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(Supp.2): 118-127. (in Chinese with English abstract)

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.z2.016 <http://www.tcsae.org>

0 引言

施肥制度是决定土壤质量和农田生态系统可持续生产力和稳定性的基础^[1], 近半个世纪以来, 随着人们对作物产量的需求逐渐增加, 对化肥的需求量也日益增多^[2], 长期大量施用化肥的弊端(如利用率下降、农产品品质下降、土壤板结、酸化、生物多样性失衡及环境污染等)也逐渐突显出来^[3-4]。中国有机肥料资源丰富, 其中以畜禽粪便、作物秸秆及绿肥等为主, 但资源利用率低, 每年有 2/3 的有机废弃物被遗弃和浪费, 严重危害环境^[2,5]。大量研究表明, 施用有机肥或者有机无机配施, 不仅能够培肥地力, 提高作物产量, 还可以很好地缓解大量施用化肥造成的环境污染问题^[6-7]。

土壤活性有机碳库作为土壤有机碳响应施肥措施的指示碳库, 通过调节土壤能源物质和微生物活性影响土壤碳库的有效性, 是土壤圈中周转较快的活跃组分, 与土壤生态系统有机碳的迁移、固持和 CO₂ 的释放有密切联系^[8-9]。根据不同的分离提取方法如生物提取法、热稳定性法、物理分级法、及化学氧化法可将其分为土壤微生物量碳(microbial biomass carbon, MBC)、可溶性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)、颗粒有机碳(particulate organic carbon, POC)和易氧化有机碳(easily oxidizable carbon, EOC)^[10-11]。目前, 国内外对长期施肥土壤活性有机碳库影响的研究也较为广泛, 大量研究表明, 长期施肥尤其是长期施用有机肥可显著提高 MBC、DOC、POC 和 EOC 含量, 达到提高作物产量与培肥地力的效果^[8,12-15]。

土壤有机碳矿化是土壤中重要的生物化学过程之一, 矿化作用不仅能够分解养分并提供能量, 供作物生长发育; 同时, 土壤有机碳矿化又是土壤碳库的最大净输出途径, 其作用的减弱也有利于有机碳库的固定及贮存^[16]。长期不同施肥处理的土壤有机碳累积矿化量差异显著, 一般为长期施肥高于长期不施肥处理, 长期施有机肥(或有机无机配施)高于施化肥处理^[17-18]; 其主要原因是有机肥的

收稿日期: 2016-08-26 修订日期: 2016-09-23

基金项目: 中国农业科学院农业资源与区划研究所中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(IARRP-2016); 国家自然科学基金项目(31301843)。作者简介: 戚瑞敏, 主要研究方向为土壤肥力监测及土壤微生物生态学, 北京, 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 100081, Email: qiruimin529@163.com

^{*}通信作者: 李娟, 主要从事土壤肥力监测及土壤微生物生态研究, 北京, 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 100081, Email: lijuan02@caas.cn

施用直接增加了土壤有机碳的输入^[19-20], 促进了土壤微生物活性, 改变了土壤 C、N 的有效性, 进而影响到土壤碳库的稳定性和温室气体的排放等^[22,21]。此外, 外源有机碳的加入, 还会使土壤原有有机碳分解速率在短时间内发生剧烈反应, 形成激发效应^[22]。袁淑芬等^[23]研究的添加凋落物等外源有机碳对不同森林土壤有机碳分解的影响结果表明葡萄糖引起的激发效应强度显著高于杉木凋落物, 且不同森林土壤的激发效应强度表现为杉木人工林 > 天然次生林。Kuzyakov 等^[22,24]和 Qiao 等^[25]认为激发效应与土壤养分和活性有机碳库组分变化特征密切相关。

综上所述, 确定土壤有机碳矿化过程、活性有机碳库组分的含量及变化, 不仅有利于改善土壤理化性质、提高土壤肥力, 而且还能够控制土壤温室气体的排放, 对减缓温室效应具有重要的指导意义。然而, 在长期不同施肥土壤中添加牛粪对土壤有机碳矿化、活性有机碳库组分变化的影响及其激发效应目前尚未明确。本研究以始建于 1986 年的长期定位施肥试验为平台, 通过研究添加牛粪后长期不同施肥土壤的有机碳矿化特征及其活性碳库组分变化, 揭示牛粪对不同施肥土壤有机碳矿化及激发效应的影响机制, 旨在为提升土壤肥力, 保持和改善土壤的生物学特性提供理论依据, 进而实现农业资源的效益最大化及农业的可持续发展。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤采自于中国农业科学院山东省禹城试验基地(建于 1986 年 10 月), 该试验地位于华北平原东部(116°34'E, 36°50'N), 光热资源丰富, 太阳辐射总量 5 225 MJ/m², 年日照时数 2 640 h, ≥0 °C 积温 4951 °C, ≥10 °C 积温 4 441 °C, 年平均气温 13.1 °C; 雨热同期, 年平均降雨量 569.6 mm, 水面蒸发量 2 094.5 mm, 无霜期 206 d; 属暖温带半湿润季风气候。该试验地土壤类型为潮土, 成土母质为黄河冲积物, 耕层质地为轻壤(黏粒 21.4%; 粉粒 65.6%; 砂粒 3.0%); 1986 年的土壤(0~20 cm)基本理化性状分别为: 有机碳 3.93 g/kg, 全氮 0.51 g/kg, 有效氮 37.5 mg/kg, 速效磷 7.5 mg/kg, 速效钾 73.0 mg/kg, 阳离子交换量 15.84 cmol/kg, 水溶性盐 0.96 mg/kg, pH 值 8.56。主要种植制度为冬小麦-夏玉米一年两熟制。试验设有 6 个处理, 分别为长期不施肥(CK); 常量有机肥(SMA); 常量化肥(SMF); 常量有机无机配施(1/2(SMA+SMF)); 高量有机肥(DMA); 高量化肥(DMF), 重复 4 次, 共 24 个小区, 每个小区之间用 0.8 m 的水泥挡板隔开, 小区面积 4 m×7 m=28 m²。常量施肥下, 化肥年施用量为 N:375~450 kg/hm²、P₂O₅:225~300 kg/hm²、K₂O:150 kg/hm²(钾肥自 1992 年开始施用), 有机肥施用量根据每年选用肥料样品的分析结果, 以全氮含量为标准折算。高量施肥处理的总氮量是常量施肥处理的 2 倍。按照各处理全年施肥总量, 冬小麦(济麦 22)、夏玉米(郑单 958) 每季作物各 50%, 磷肥、钾肥和有机肥在作物播种前做基肥一次性施入, 氮肥 40% 做基肥, 60% 做追肥; 从 1997 年至今全部有机肥在冬

小麦播种前一次性施入。有机肥选用当地农户或畜牧养殖场腐熟牛粪, 主要养分含量氮(N)1.00%~1.84%, 磷(P₂O₅)0.58%~1.67%, 钾(K₂O)0.98%~1.98%, 磷、钾化肥分别选用尿素、磷酸二铵、过磷酸钙和硫酸钾, 以肥料样品养分分析结果计算施肥量。具体施肥措施及小区试验设计已在 Li 等^[14]的研究中有详细介绍。

1.2 试验设计

土壤样品取自于 2014 年 10 月玉米收获后, 每个小区随机选取 5~10 个点, 用土钻(直径 3 cm)取 0~20 cm 的土样混匀, 装好用冰盒立即带回实验室。将土壤样品分成 2 部分, 一部分风干用于土壤基本理化性质的测定; 另一部分过 2 mm 筛并贮存于 4 °C 用于后续的室内培养试验。

选取对照(CK)和 3 个等氮量常量施肥处理(SMA、SMF、1/2(SMA+SMF))共 16 个土壤样品进行室内培养试验。称取相当于 100 g 干质量的鲜土(培养前将土壤含水率调至田间最大持水量的 60%)于装有三通阀橡胶瓶塞的 250 mL 培养瓶中分别进行不添加(M0)和添加牛粪(M1)2 个处理的培养试验, 同时用不添加土壤的培养瓶作为对照, 在 25 °C 恒温培养箱中培养 79 d, 每个土壤样品设 2 个重复, 并在培养后第 2、4、6、8、10、13、16、19、22、25、29、33、37、44、51、58、65、72 和 79 天时取气, 测定土壤 CO₂ 呼吸速率及其累积矿化量。每次采气后打开培养瓶塞通气 5 min, 使瓶内气体与大气进行充分交换, 同时用称重法调节土壤含水率使其保持在田间最大持水量的 60%。培养 79 d 后, 取出土样保存于 4 °C 下用于土壤有机碳及活性碳库组分的测定分析。

牛粪选用 2014 年禹城当地畜牧养殖场腐熟牛粪, 主要养分的质量分数为碳(C)21.51%, 氮(N)1.67%, 磷(P₂O₅)2.68%, 钾(K₂O)1.57%, 碳氮比为 12.88, 牛粪的施用量为 1.15 g/100 g(干基计), 按与本定位试验施用牛粪的等氮量(450kg/hm²)折算。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤的基本化学性质测定

根据鲍士旦^[26]的标准方法进行分析测定, 各指标的具体测定方法如下:

1) 土壤有机碳(SOC)用重铬酸钾氧化法测定。用 0.8 mol/L 的 1/6 K₂Cr₂O₇ 氧化土壤有机质(170~180 °C 油浴 5 min), 剩余的重铬酸钾溶液用硫酸亚铁来滴定, 由所消耗的重铬酸钾量, 计算有机碳含量。

2) 土壤全氮(TN)用凯氏定氮法测定。浓硫酸消化后, 碱化蒸馏出来的氨用硼酸吸收, 以标准酸溶液滴定, 求土壤全氮含量。

3) 速效磷(Available P)用 0.5 mol/L 的 NaHCO₃ 浸提法测定。0.5 mol/L 的 NaHCO₃ 溶液浸提出的样品, 用钼锑抗试剂显色, 在紫外分光光度计上比色测定。

4) 速效钾(Available K)用火焰光度计法测定。醋酸铵浸出液用火焰光度计直接测定;

5) pH 值以 1:2.5 的土水比在 pH 计上测定。

1.3.2 土壤呼吸速率及 CO₂ 累计矿化量的测定

用注射器插入三通阀通气口中分别在培养后第 2、4、6、8、10、13、16、19、22、25、29、33、37、44、51、

58、65、72 和 79 d 取气, 每次取 5 mL 气体, 保存于气相色谱自动进样管中, 每次采气前注意用空气清洗注射器, 采气后 24 h 内用气相色谱仪 (Agilent Technologies 7890B GC System) 测定 CO₂ 的含量。

$$F = (Q_t - Q_0)V \times M_0 \times 273 \times 1000 / [22.4 \times m \times t \times (273 + T)] \quad (1)$$

式中: F 为 CO₂ 产生速率 (mg / (kg · h)), V 为培养容器中气体体积 (L), m 为土壤样品干质量 (kg), t 为培养时间 (h), Q_t 为培养 t 时刻的 CO₂ 体积分数 (10^{-6}), Q_0 为培养 0 时刻的 CO₂ 体积分数 (10^{-6}), M_0 为 CO₂ 的摩尔质量 (g/mol), T 为培养温度 (°C)。

1.3.3 土壤活性有机碳库组分的测定

土壤微生物量碳 (MBC): 氯仿熏蒸——K₂SO₄ 浸提法, 总有机碳/总氮 (TOC/TN) 自动分析仪 (Multi N/C @205 3100, 德国耶拿) 测定。

预培养后, 称取新鲜土壤于小烧杯中, 将其置于真空抽滤器中用去乙醇氯仿在 25 °C 的培养箱中避光熏蒸 24 h。然后反复抽滤 (去除氯仿), 将熏蒸的土壤样品用 0.5 mol/L K₂SO₄ 溶液振荡浸提, 与此同时以相同的方法提取未熏蒸的土壤, 浸提液用 TOC/TN 自动分析仪测定。微生物量碳: $B_C = E_C / K_{EC}$ 。其中, E_C 为熏蒸和未熏蒸土壤测定碳值的差值; K_{EC} 为转换系数, 取值 0.45^[27-28]。

可溶性有机碳 (DOC): 0.5 mol/L K₂SO₄ 提取法-TOC/TN 自动分析仪测定。称取相当于 10 g 干质量的鲜土于 125 mL 的塑料瓶中, 加入 50 mL 0.5 mol/L K₂SO₄, 在往复振荡机中振荡 (250 r/min) 提取 1 h, 然后 2 500 r/min 离心 15 min, 上清液通过真空泵抽滤过 0.45 μm 的滤膜后, 用 TOC/TN 自动分析仪测定其 DOC 含量^[29-30]。

颗粒态有机碳 (POC): 5 g/L 六偏磷酸钠提取法。称取过 2 mm 筛的风干土 10 g 于 125 mL 的塑料瓶中, 加入 30 mL 5 g/L 的六偏磷酸钠溶液, 在往复振荡机中振荡 18 h (90 r/min), 分散。分散液置于 53 μm 的筛上, 用蒸馏水冲洗至沥液澄清。将筛上 53~2 000 μm 的土样冲洗至烧杯中 60 °C 烘干至恒定质量, 计算其占整个土壤样品的百分比并测定烘干样品中的有机碳含量, 将烘干样品中的土壤有机碳含量换算成整个土壤样品的对应的颗粒有机碳组分含量^[31-32]。

易氧化有机碳 (EOC): 333 mmol/L 高锰酸钾氧化法。土壤样品研磨过 0.5 mm 筛, 根据土壤有机碳含量计算含有

15 mg 土壤有机碳的土壤样品质量作为待测样品的称取质量; 称待测样于 50 mL 的带盖离心管中, 以不加土样作为空白, 加 25 mL 333 mmol/L 的高锰酸钾溶液, 室温下振荡 1 h, 然后离心 5 min (4 000 rpm)。将上清液用去离子水稀释 250 倍, 稀释样品用分光光度计 (SPECORD200, 德国耶拿) 在 565 nm 处测定吸光值。同时配置不同浓度的高锰酸钾溶液测定其在 565 nm 处的吸光值, 绘制标准曲线, 将待测样的吸光值代入标准曲线方程得到氧化有机碳后剩余高锰酸钾的浓度, 与空白的高锰酸钾浓度的差值即为氧化活性有机碳后的高锰酸钾溶液的浓度变化值。根据假设, 氧化过程中高锰酸钾浓度变化 1 mmol/L 消耗 0.75 mmol 或 9 mg 碳计算得出活性有机碳 EOC 的含量^[33-34]。

1.4 数据分析

用一级反应动力学方程拟合土壤有机碳矿化过程, 其方程表达式为

$$C_t = C_0 (1 - e^{-kt}) \quad (2)$$

式中 C_0 为土壤中 CO₂-C 潜在矿化量 (mg/kg), C_t 为经过 t 时间后土壤累积释放的 CO₂-C 量 (mg/kg), k 为矿化速率常数, t 为培养时间 (d)。

添加牛粪后激发效应 PE 的计算

$$PE = 100 \times (CO_2-C_{\text{treatment}} - CO_2-C_{\text{control}}) / CO_2-C_{\text{control}} \quad (3)$$

式中 $CO_2-C_{\text{treatment}}$ 为添加牛粪处理后土壤 SOC 分解释放的 CO₂ 量, CO_2-C_{control} 为未添加牛粪的 SOC 释放的 CO₂ 量^[35-36]。

采用 Excel 2013 及 Origin 8.5 对试验数据进行处理及作图, 用 Canoco5.0 进行冗余分析, 用 SAS 8.0 软件进行统计分析, 最小显著差数法 LSD 检验差异显著性 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 长期不同施肥土壤基本化学性质特征变化

28a 长期不同施肥显著增加了土壤有机碳、全氮、速效磷含量, 却显著降低了土壤 pH 值 (表 1)。等氮量常量施肥条件下, 长期单施有机肥处理的土壤有机碳、全氮、速效磷含量最高, 长期施用化肥处理的最低; 而有效钾的含量表现为在长期施用有机肥处理下最高, 长期施用化肥的次之, 长期有机无机配施的与长期不施肥

表 1 不同施肥制度土壤化学性质特征变化

Table 1 Changes in soil chemical properties under long-term fertilization regimes

处理 Treatment	pH 值 pH value	有机碳 Soil organic carbon SOC (g · kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen TN (g · kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphorus P ₂ O ₅ (mg · kg ⁻¹)	有效钾 Available potassium K ₂ O (mg · kg ⁻¹)	微生物量碳 Microbial biomass carbon MBC (mg · kg ⁻¹)	可溶性有机碳 Dissolved organic carbon DOC (mg · kg ⁻¹)	颗粒有机碳 Particulate organic carbon POC (g · kg ⁻¹)	易氧化有 机碳 Easily oxidizable carbon EOC (g · kg ⁻¹)
CK	8.67±0.10a	5.01±0.39d	0.81±0.01d	5.26±0.56d	94.20±5.86c	218.03±11.81d	298.39±24.79c	0.95±0.24c	0.73±0.04d
SMA	8.40±0.02b	14.88±0.65a	1.74±0.02a	159.24±15.8a	126.17±2.84a	422.36±16.72a	380.37±9.69a	3.84±0.42a	2.52±0.35a
SMF	8.34±0.04b	5.90±0.10c	0.96±0.04c	20.27±0.44c	110.19±2.46b	258.78±15.54c	350.76±27.69ab	1.35±0.12c	1.04±0.12c
1/2(SMA+ SMF)	8.31±0.08b	10.20±0.41b	1.30±0.02b	70.89±7.76b	99.12±4.02c	325.34±16.99b	326.48±9.07bc	2.59±0.17b	1.62±0.05b

注: CK: 不施肥; SMA: 常量有机肥; SMF: 常量化肥; 1/2(SMA+SMF): 常量有机无机配施同一列数据后的不同字母表示处理之间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Note: CK, no-fertilizer; SMA, standard rate of organic manure treatment; SMF, standard rate of mineral fertilizer treatment; 1/2(SMA+SMF), half-standard rate of organic manure plus half-standard rate of mineral fertilizer treatment. Different letter in the same column are significantly different among treatments ($P < 0.05$). The same below.

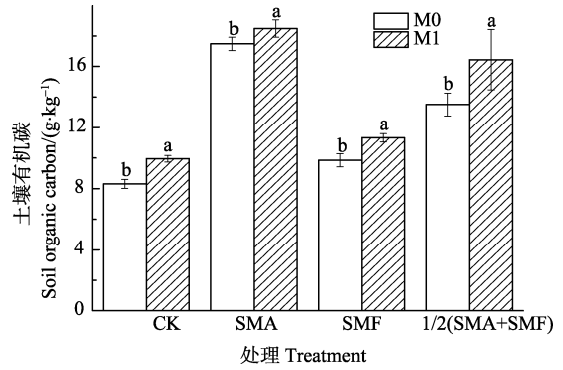
处理的无显著差异。与长期不施肥处理相比，长期不同施肥处理土壤活性有机碳组分含量（微生物量碳、可溶性有机碳、颗粒有机碳和易氧化有机碳）增加幅度分别为 18.69%~93.71%、9.41%~27.47%、42.27%~306.58% 和 41.77%~244.38%，其中长期单施有机肥对土壤活性有机碳含量的提升效果最显著。除可溶性有机碳外，土壤活性有机碳库组分含量随有机肥施用量的增加而显著增加。

2.2 添加牛粪对长期不同施肥土壤有机碳及活性碳库组分变化的影响

在长期不同施肥处理土壤中添加牛粪并培养 79 d 后，研究结果显示，无论添加牛粪与否，不同施肥处理土壤有机碳含量之间差异显著，其变化趋势均表现为 SMA > 1/2(SMA+SMF) > SMF > CK ($P < 0.05$) (图 1)。牛粪的添加能够显著增加不同施肥处理的土壤有机碳含量，但提升效果不同。添加牛粪对长期施有机肥土壤的有机碳含量提升幅度最小，为 5.79%；对长期有机无机配施土壤的有机碳含量增加幅度最大，为 21.88%；长期不施肥处理及长期施用化肥处理土壤有机碳的含量分别增加了 19.89% 和 14.99%，这表明牛粪的添加对不同施肥土壤有机碳含量的影响不同，且牛粪的添加更利于常量有机无机配施土壤有机碳的积累。

从图 2 中可以看出，牛粪的添加对长期不同施肥土壤微生物量碳、颗粒有机碳和易氧化有机碳及可溶性有机碳含量的影响不同 (图 2)。图 2a 显示，培养 79 d 后，不添加牛粪

处理下，长期不同施肥土壤微生物量碳含量差异显著，表现为 SMA > 1/2(SMA+SMF) > SMF > CK ($P < 0.05$)；添加牛粪下，其变化趋势为 SMA > 1/2(SMA+SMF) > CK > SMF ($P < 0.05$)。与不添加牛粪相比，牛粪的添加使长期不施肥处理的土壤微生物量碳含量显著增加了 17.78%；而使长期施用化肥土壤的显著降低了 8.15%；牛粪的添加对长期施用常量有机肥及常量有机无机配施土壤微生物量碳含量的影响不显著。



注：M0：不添加牛粪；M1：添加牛粪。不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)，下同。
Note: M0, non-cattle manure; M1, addition cattle manure; the different letter in the same column are significantly different ($P < 0.05$). The same as below.

图 1 添加牛粪 79 d 后对不同施肥处理土壤有机碳含量变化的影响

Fig.1 Effects of cattle manure addition on soil organic carbon contents under different fertilizer treatments after 79 d incubation

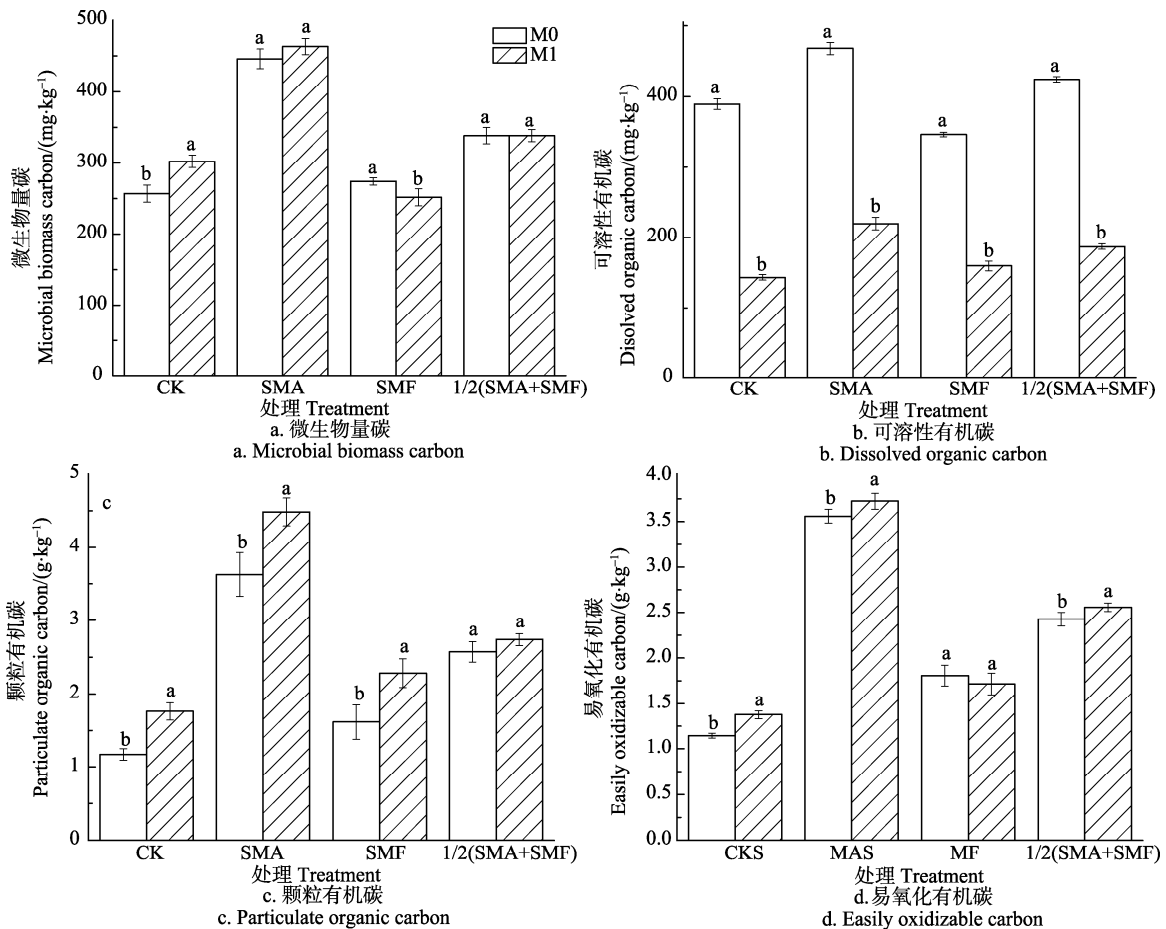


图 2 添加牛粪 79 d 后对不同施肥处理土壤活性有机碳组分变化特征的影响

Fig. 2 Effects of cattle manure addition on soil labile organic carbon fractions under different fertilizer treatments after 79 d incubation

对添加牛粪后长期不同施肥土壤可溶性有机碳含量的变化特征进行分析,结果显示(图2b),不添加牛粪处理下,不同施肥制度土壤可溶性有机碳含量差异显著,表现为 $SMA > 1/2(SMA+SMF) > CK > SMF$ ($P < 0.05$);添加牛粪后,其变化趋势为 $SMA > 1/2(SMA+SMF) > SMF > CK$ ($P < 0.05$)。与不添加牛粪相比,添加牛粪显著降低了长期不同施肥(CK, SMA, SMF 和 $1/2(SMA+SMF)$)土壤的可溶性有机碳含量,分别降低了63.21%、53.07%、53.88%和55.97%。

对于土壤颗粒有机碳(图2c),无论添加牛粪与否,培养79d后,长期不同施肥处理的土壤颗粒有机碳含量之间差异显著,均表现为 $SMA > 1/2(SMA+SMF) > SMF > CK$ ($P < 0.05$)。与不添加牛粪相比,添加牛粪显著提高了长期不施肥、长期施用化肥和长期施用有机肥土壤的颗粒有机碳含量,增加比例分别为50.92%、41.60%和23.53%,但对长期常量有机无机配施土壤的颗粒有机碳含量影响不显著,只提高了6.42%。

土壤易氧化有机碳含量的变化特征见图2d,无论添加牛粪与否,长期不同施肥处理的土壤易氧化有机碳含量之间均差异显著,表现为 $SMA > 1/2(SMA+SMF) > SMF > CK$ ($P < 0.05$)。牛粪的添加对长期不同施肥处理的土壤易氧化有机碳含量影响不同。牛粪的添加显著增加了长期不施肥、长期施用常量有机肥及长期有机无机配施土壤的易氧化有机碳含量,增加比例分别为20.08%、4.59%和5.54%,而对长期施用常量化肥土壤的易氧化有机碳的影响不显著。

2.3 添加牛粪对长期不同施肥土壤 CO_2-C 释放速率的影响

图3显示,无论添加还是不添加牛粪,长期不同施肥土壤 CO_2-C 释放速率变化呈现随时间延长而降低的一致趋势,表现为前快、后慢。其变化趋势整体上可分为3个阶段:第1阶段为0~4d急剧下降阶段;第2阶段为4~44d波动下降阶段,下降速率有所降低;第3阶段为44~79d矿化速率稳定期。

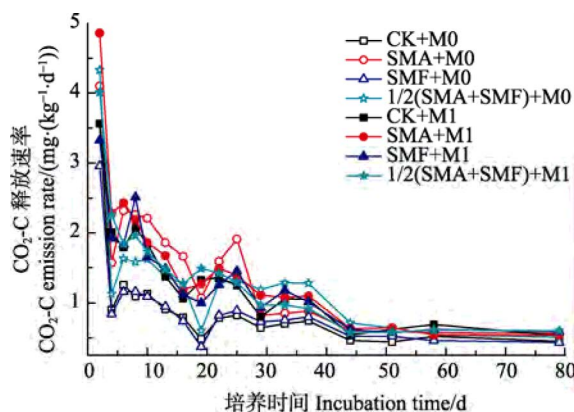


图3 添加牛粪后不同施肥制度土壤 CO_2-C 释放速率动态变化
Fig. 3 Dynamics of emission rates of soil CO_2-C under different fertilizer treatments with cattle manure addition during incubation

整个培养过程中,长期不施肥及长期施用化肥处理下的土壤 CO_2-C 释放速率均较低。在不添加牛粪情况

下,长期施用有机肥及长期有机无机配施的土壤 CO_2-C 释放速率高于长期施用化肥及长期不施肥土壤的,而牛粪的添加减小了不同施肥制度土壤的 CO_2-C 释放速率之间的差异。除此之外,牛粪的添加对长期不施肥及长期施用化肥土壤 CO_2-C 释放速率的影响高于对长期施用有机肥及长期有机无机配施土壤 CO_2-C 释放速率的影响。

2.4 添加牛粪对长期不同施肥土壤有机碳累积矿化量的影响

图4显示,长期施肥处理土壤有机碳的累积矿化量(CO_2-C)高于长期不施肥处理的;等氮量施肥条件下,长期施用有机肥及有机无机配施的土壤有机碳累积矿化量高于长期施化肥处理的。牛粪的添加增强了长期不同施肥土壤有机碳的累积矿化量,其中,添加牛粪后长期施用常量有机肥处理土壤有机碳的累积矿化量最高。与不添加牛粪的处理相比较,牛粪的添加增加了长期不施肥及施常量化肥处理土壤有机碳的累积矿化量(在79d时的累积矿化量分别增加了48.4%和48.2%),而对长期施用有机肥及有机无机配施处理土壤有机碳的累积矿化量提升效果不显著。由此可以看出,牛粪的添加更能刺激长期不施肥及常量化肥土壤的有机碳矿化,而对长期施用有机肥及有机无机配施土壤的扰动较小。

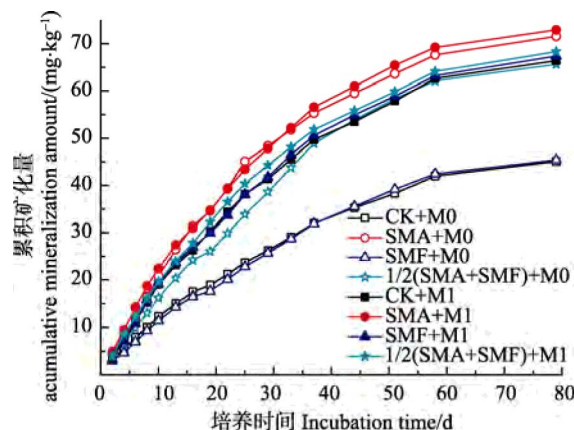


图4 添加牛粪对土壤有机碳累积矿化量的影响

Fig. 4 Changes in accumulation mineralization amount of soil organic carbon in different fertilized soils with cattle manure addition during incubation

无论添加牛粪与否,长期不同施肥土壤有机碳矿化过程均符合一级反应动力学方程,一级动力学方程拟合的决定系数均达到0.98以上,且长期单施有机肥的土壤有机碳潜在矿化量显著高于长期单施化肥和长期不施肥(表2)。进一步分析可以看出,与不添加牛粪处理相较,牛粪的添加显著增加了长期不施肥、长期单施化肥及长期单施有机肥土壤的有机碳潜在矿化量,却显著降低了长期有机无机配施土壤的潜在矿化量;除此之外,牛粪的添加也显著增加了长期不施肥、长期单施化肥和长期有机无机配施土壤的有机碳矿化速率常数,分别增加了21.74%、35.00%和45.00%。

表 2 土壤有机碳矿化的一级动力学方程拟合参数

Table 2 Estimated parameters according to first order kinetic model for soil organic carbon mineralization

处理 Treatment	潜在矿化量 Potential mineralization amount C_0 /(mg \cdot kg $^{-1}$)	矿化速率常数 Mineralization rate constant k	R^2
CK	55.995±1.230c	0.023±0.001b	0.991
M0			
SMA	83.959±0.809b	0.029±0.001a	0.997
SMF	59.195±2.272c	0.020±0.001c	0.981
1/2(SMA+SMF)	88.229±2.102a	0.020±0.001c	0.993
M1			
CK	78.021±1.298b	0.028±0.001ab	0.993
SMA	88.263±1.056a	0.028±0.001ab	0.996
SMF	79.123±1.061b	0.027±0.010b	0.996
1/2(SMA+SMF)	77.560±0.805b	0.029±0.001a	0.997

2.5 添加牛粪对长期不同施肥土壤有机碳矿化的激发效应

激发效应是指添加新鲜有机物料后土壤有机碳矿化在短期内发生剧烈变化的一种现象。将牛粪添加到长期不同施肥的土壤中，并进行为期 79 d 的培养，结果表明，牛粪的添加能够促进长期不同施肥土壤有机碳的矿化，产生正激发效应，且牛粪的添加对长期不同施肥土壤的激发效应差异显著（图 5）。图 5 显示，牛粪的添加对长期不施肥、长期施用常量有机肥、常量化肥和常量有机无机配施土壤矿化的激发效应分别达到 48.56%、3.60%、48.43% 和 3.92%。添加牛粪后，长期不施肥及长期施用常量化肥土壤表现出来的激发效应显著高于长期施用常量有机肥及常量有机无机配施土壤表现出来的激发效应之间差异不显著。

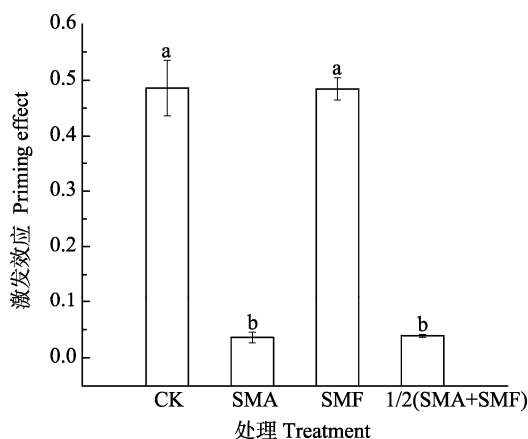
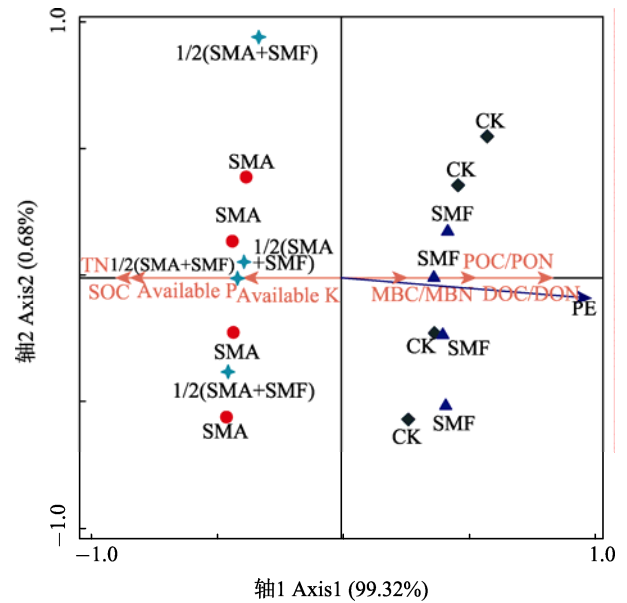


图 5 添加牛粪对不同施肥土壤有机碳矿化的激发效应
Fig. 5 Priming effects of soil organic carbon mineralization among different fertilized soils with cattle manure addition.

以土壤原有有机碳及养分含量为自变量，激发效应为因变量进行冗余分析(RDA)，其结果显示（图 6），激发效应与土壤微生物量碳氮比（MBC/MBN）、可溶性有机碳氮比（DOC/DON）和颗粒有机碳氮比（POC/PON）呈极显著正相关，且与各活性组分之间的相关性表现为

DOC/DON > POC/PON > MBC/MBN；而与土壤养分含量呈极显著负相关，其中土壤有机碳和氮对激发效应的影响较大，有效钾的最小。不同施肥处理中，长期不施肥及长期施用化肥的处理与激发效应同向，沿轴 1 正方向集聚。这与前面所述的添加牛粪对长期不施肥及长期施用化肥土壤的激发效应较高的结果一致。



注：◆，CK：不施肥；●，SMA：常量有机肥；▲，SMF：常量化肥；◆，1/2(SMA+SMF)：常量有机无机配施。
Note：◆，CK, no-fertilizer；●，SMA, standard rate of organic manure treatment；▲，SMF, standard rate of mineral fertilizer treatment；◆，1/2(SMA+SMF), half-standard rate of organic manure plus half-standard rate of mineral fertilizer treatment.

图 6 环境因子与土壤有机碳矿化激发效应相关关系

Fig. 6 Redundancy analysis (RDA) between priming effects of soil organic carbon mineralization among different fertilized soils with cattle manure addition and environmental factors

3 讨论

3.1 长期不同施肥潮土活性有机碳库组分的变化特征

长期不同施肥尤其是长期施用有机肥，均能显著提高土壤有机碳、全氮，速效磷和有效钾含量，为土壤微生物活动及作物生长提供了充足的养分。此结果在我们先前的研究中已有报道^[14,37]。土壤活性有机碳是作物必需营养物质的主要库源，是衡量土壤肥力的重要指标，在土壤碳氮循环中占至关重要的作用^[39-41]。Liu 等^[38,42]研究了中国华北地区不同施肥制度下土壤有机碳库的变化特征，结果表明，无论是长期施肥尤其是长期施用有机肥能显著提高土壤微生物量碳，可溶性有机碳，颗粒有机碳含量，体现了施用有机肥在提高土壤有机碳及其活性碳组分含量中的重要作用^[43-45]，与我们的研究结果一致。造成这一结果的主要原因是，有机肥的施用不仅能够增加土壤有机碳的输入，还能改变微生物腐解速率。这反过来又能控制土壤碳输入和输出的相对量，并且通过增加植物净生产量来刺激植物残体的降解，进而增加土壤的总有机碳储量^[12,46]。

本研究中，牛粪的添加显著增强了不同施肥制度土

壤有机碳含量、微生物量碳、颗粒有机碳、易氧化有机碳含量,这与先前很多的研究结果一致^[38,42]。其中牛粪的添加能够显著增强土壤微生物量碳含量,其主要原因是牛粪通过激发效应促进了原有有机碳的分解,增加原有有机碳的可利用性,使微生物生长增加从而增加土壤总微生物量碳;此外,牛粪的添加也为微生物提高了生长所需要的碳和其他养分,促进微生物大量繁殖,牛粪中的碳被微生物吸收导致土壤微生物量碳升高^[47]。而DOC是土壤有机碳中较小的活性碳组分,易于被微生物利用,以CO₂的形式排放到大气中^[48]。在有机质腐解过程中,土壤微生物将难以分解的有机碳转化成微生物易于利用的碳,可溶性有机碳一旦形成,将很快被微生物分解或吸收,最终导致其含量降低^[47]。

3.2 牛粪的添加对长期不同施肥潮土有机碳矿化及激发效应的影响

本研究中,牛粪的添加增加了土壤有机碳的腐解,这与Fontaine等^[49]和Thiessen等^[50]研究的外源碳的添加能够加速土壤有机碳分解的结果一致,且不同处理的土壤有机碳释放速率均表现出先快速下降再趋于稳定的一致趋势,这与张旭博等^[20]和李有兵等^[51]添加不同有机物料后土壤矿化特征的研究也有一致的结果。培养前期,由于各处理的CO₂-C的释放速率较快,其累计矿化量变化也较大。44 d以后释放速率趋于平稳,累积矿化量变化较小,其主要原因可能是后期土壤中易于利用的底物含量减少。本研究中,用一级动力方程拟合不同施肥制度土壤有机碳矿化过程结果显示,有机肥的施用对土壤潜在矿化量的影响较大,这与张旭博等^[18]和李梦雅等^[13]的研究结果一致。而牛粪的添加显著增加了长期不同施肥土壤有机碳矿化速率,可能是由外源有机物的加入提高了土壤微生物的活性和碳源利用效率^[18]。

大量研究表明,外源有机碳的添加会促进微生物的生长和土壤胞外酶的增加,从而促进土壤原有有机碳的分解,产生正激发效应^[22-23,52]。在我们的研究中,不同施肥制度下牛粪的添加促进了土壤有机碳的矿化,即产生了正激发效应。这是因为有机肥具有一定的有机碳库组分及微生物活性,牛粪的添加不仅增强了土壤有机碳的投入,还促进了土壤的微生物活性^[12,46]。而长期不施肥及长期施用化肥的处理下,激发效应显著升高,具体表现为添加牛粪显著增强了长期不施肥及长期施用化肥处理土壤的CO₂呼吸速率及培养79 d后的累积矿化量。其原因是长期不施肥及长期施用化肥处理下的土壤养分含量相对较低,微生物处于养分限制状态,牛粪的添加刺激了微生物对养分的需求,从而加速分解土壤有机碳^[23]。De Nobili等^[53]与Falchini等^[54]也认为营养元素相对缺乏的土壤受激发效应的影响比营养元素相对丰富的土壤大,与此前阐述相符。

土壤有机碳及土壤活性碳库组分是影响土壤累积矿化量的主要因素,土壤的营养物质含量和其活性组分的C/N决定激发效应的方向^[24,55]。这与我们研究的激发效应与土壤养分和各活性组分碳氮比之间的关系的结果一致。Kuzyakov等^[22,24]认为激发效应的重要机制是通过增

加土壤活性或微生物量来刺激或阻滞土壤有机质的转化,如果土壤中同时存在几种有机质,微生物会优先分解利用率高的有机质。本研究中牛粪的添加显著增强了土壤微生物量碳的含量,这也间接证实了Kuzyakov等的观点。

4 结论

长期施用有机肥有利于农田土壤的可持续发展,主要表现在2个方面:一是牛粪的添加在促进土壤有机碳分解的同时也能够提高土壤有机碳及其活性碳库组分含量,增加土壤有机碳的周转速率及土壤微生物活性,有利于土壤碳的固持;另外一方面,牛粪的添加对长期不同施肥土壤有显著的正激发效应,且对长期不施肥和长期施用化肥处理土壤的激发效应显著高于长期施用常量有机肥和常量有机无机配施土壤。研究表明添加牛粪对长期不同施肥土壤有机碳矿化的激发效应与土壤活性组分碳氮比呈正相关,与养分含量呈负相关。该系列结论可为合理施用有机肥和实现农业废弃物再利用及其效益最大化提供理论依据。

[参 考 文 献]

- [1] 赵秉强. 施肥制度与土壤可持续利用[M]. 北京: 科学出版社, 2012:1-13.
- [2] Chadwick D, Jia Wei, Tong Yan'an, et al. Improving manure nutrient management towards sustainable agricultural intensification in China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 209: 34-46.
- [3] 刘秀梅, 罗奇祥, 冯兆滨, 等. 我国商品有机肥的现状与发展趋势调研报告[J]. *江西农业学报*, 2007, 19(4): 49-52.
- [4] 金荣, 乌恩图. 我国肥料施用现状综述[J]. *宁夏农林科技*, 2012, 53(1): 56-58.
Jin Rong, Wu Entu. Review on current situation of fertilizing in China[J]. *Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology*, 2012, 53(1): 56-58. (in Chinese with English abstract)
- [5] 李书田, 刘荣乐, 陕红. 我国主要畜禽粪便养分含量及变化分析[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(1): 179-184.
Li Shutian, Liu Rongle, Shan Hong. Nutrient contents in main animal manures in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(1): 179-184. (in Chinese with English abstract)
- [6] 张夫道, 王玉军, 张建峰. 我国有机肥料利用现状、问题和产业化[C]//中国土壤学会海峡两岸土壤肥科学术交流研讨会, 2004, 260-267.
- [7] 林治安, 赵秉强, 袁亮, 等. 长期定位施肥对土壤养分与作物产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(8): 2809-2819.
Lin Zhian, Zhao Bingqiang, Yuan Liang, et al. Effects of organic manure and fertilizers long-term located application on soil fertility and crop yield[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(8): 2809-2819. (in Chinese with English abstract)
- [8] Zheng Jufeng, Zhang Xuhui, Li Lianqing, et al. Effect of long-term fertilization on C mineralization and production of CH₄ and CO₂ under anaerobic incubation from bulk samples and particle size fractions of a typical paddy soil[J].

- Agriculture, ecosystems & environment, 2007, 120(2): 129–138.
- [9] Zhao Shicheng, Li Kejiang, Zhou Wei, et al. Changes in soil microbial community, enzyme activities and organic matter fractions under long-term straw return in north-central China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment. 2016, 216: 82–88.
- [10] Haynes R J. Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: an overview[J]. Advances in Agronomy, 2005, 85: 221–268.
- [11] 张丽敏, 徐明岗, 娄翼来, 等. 土壤有机碳分组方法概述[J]. 中国土壤与肥料, 2014, 4: 1–6.
Zhang Limin, Xu Minggang, Lou Yilai, et al. Soil organic carbon fractionation methods[J]. Soil and Fertilizer Sciences, 2014, 4: 1–6. (in Chinese with English abstract)
- [12] Rudrappa L, Purakayastha T J, Singh D, et al. Long-term manuring and fertilization effects on soil organic carbon pools in a Typic Haplustep of semi-arid sub-tropical India[J]. Soil and Tillage Research, 2006, 88: 180–192.
- [13] 李梦雅, 王伯仁, 徐明岗, 等. 长期施肥对红壤有机碳矿化及微生物活性的影响[J]. 核农学报, 2009, 23(6): 1043–1049.
Li Mengya, Wang Boren, Xu Minggang, et al. Effect of long-term fertilization on mineralization of organic carbon and microbial activity in red soil[J]. Acta Agriculturae Nucleatae Sinica, 2009, 23(6): 1043–1049. (in Chinese with English abstract)
- [14] Li Juan, Cooper J M, Lin Zhian, et al. Soil microbial community structure and function are significantly affected by long-term organic and mineral fertilization regimes in the North China Plain[J]. Applied Soil Ecology, 2015, 96: 75–87.
- [15] Qi Ruimin, Li Juan, Lin Zhian, et al. Temperature effects on soil organic carbon, soil labile organic carbon fractions, and soil enzyme activities under long-term fertilization regimes[J]. Applied Soil Ecology, 2016, 102: 36–45.
- [16] 李忠佩, 张桃林, 陈碧云. 可溶性有机碳的含量动态及其与土壤有机碳矿化的关系[J]. 土壤学报, 2004, 41(4): 544–552.
Li Zhongpei, Zhang Taolin, Chen Biyun. Dynamics of soluble organic carbon and its relation to mineralization of soil organic carbon[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(4): 544–552. (in Chinese with English abstract)
- [17] 陈涛, 郝晓晖, 杜丽君, 等. 长期施肥对水稻土土壤有机碳矿化的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(7): 1494–1500.
Chen Tao, Hao Xiaohui, Du Lijun, et al. Effects of long-term fertilization on paddy soil organic carbon mineralization[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(7): 1494–1500. (in Chinese with English abstract)
- [18] 张旭博, 徐明岗, 林昌虎, 等. 施肥对红壤有机碳矿化特征的影响[J]. 贵州农业科学, 2011, 39(6): 99–102.
Zhang Xubo, Xu Minggang, Lin Changhu, et al. Effect of fertilization on mineralization characteristics of organic carbon in red soil[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2011, 39(6): 99–102. (in Chinese with English abstract)
- [19] 孙凤霞, 张伟华, 徐明岗, 等. 长期施肥对红壤微生物生物量碳氮和微生物碳源利用的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(11): 2792–2798.
Sun Fengxia, Zhang Weihua, Xu Minggang, et al. Effects of long-term fertilization on microbial biomass carbon and nitrogen and on carbon source utilization of microbes in a red soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(11): 2792–2798. (in Chinese with English abstract)
- [20] 张旭博, 徐明岗, 张文菊, 等. 添加有机物料后红壤 CO₂ 释放特征与微生物生物量动态[J]. 中国农业科学, 2011, 44(24): 5013–5020.
Zhang Xubo, Xu Minggang, Zhang Wenju, et al. Characteristics of CO₂ emission and microbial biomass dynamics after adding various organic materials in red soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(24): 5013–5020. (in Chinese with English abstract)
- [21] Berthrong S T, Buckley D H, Drinkwater L E. Agricultural management and labile carbon additions affect soil microbial community structure and interact with carbon and nitrogen cycling[J]. Microbial Ecology, 2013, 66(1): 158–170.
- [22] Kuzyakov Y, Friedel J K, Stahr K. Review of mechanisms and quantification of priming effects[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(11): 1485–1498.
- [23] 袁淑芬, 汪思龙, 张伟东. 外源有机碳和温度对土壤有机碳分解的影响[J]. 土壤通报, 2015, 46(4): 916–922.
Yuan Shufen, Wang Silong, Zhang Weidong. Effect of external organic carbon and temperature on SOC decomposition[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46(4): 916–922. (in Chinese with English abstract)
- [24] Kuzyakov Y, Bol R. Sources and mechanisms of priming effect induced in two grassland soils amended with slurry and sugar[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(4): 747–758.
- [25] Qiao Na, Xu Xingliang, Hu Yuehua, et al. Carbon and nitrogen additions induce distinct priming effects along an organic-matter decay continuum[J]. Scientific Reports, 2016, 6.
- [26] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [27] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1987, 19(6): 703–707.
- [28] Wu J, Joergensen R G, Pommerening B, et al. Measurement of soil microbial biomass C by fumigation-extraction—an automated procedure[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1990, 22(8): 1167–1169.
- [29] Wright A L, Provin T L, Hons F M, et al. Dissolved organic carbon in soil from compost-amended bermudagrass turf[J]. HortScience, 2005, 40(3): 830–835.
- [30] Jones D L, Willett V B. Experimental evaluation of methods to quantify dissolved organic nitrogen (DON) and dissolved organic carbon (DOC) in soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38: 991–999.
- [31] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(3): 777–783.
- [32] 刘梦云, 常庆瑞, 齐雁冰, 等. 黄土台塬不同土地利用土壤有机碳与颗粒有机碳[J]. 自然资源学报, 2010, 25(2): 218–226.
Liu Mengyun, Chang Qingrui, Qi Yanbing, et al. Soil organic

- carbon and particulate organic carbon under different land use types on the Loess Plateau[J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(2): 218–226. (in Chinese with English abstract)
- [33] Blair G J, Lefroy R D B, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems[J]. *Crop and Pasture Science*, 1995, 46(7): 1459–1466.
- [34] 佟小刚. 长期施肥下我国典型农田土壤有机碳库变化特征[D]. 北京: 中国农业科学院, 2008.
- [35] Hamer U, Marschner B. Priming effects in different soil types induced by fructose, alanine, oxalic acid and catechol additions[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(3): 445–454.
- [36] Wang Qingkui, Wang Yanping, Wang Silong, et al. Fresh carbon and nitrogen inputs alter organic carbon mineralization and microbial community in forest deep soil layers[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 72: 145–151.
- [37] 温延臣, 李燕青, 袁亮, 等. 长期不同施肥制度土壤肥力特征综合评价方法[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(7): 91–99. Wen Yanchen, Li Yanqing, Yuan Liang, et al. Comprehensive assessment methodology of characteristics of soil fertility under different fertilization regimes in North China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(7): 91–99. (in Chinese with English abstract)
- [38] Liu Enke, Yan Changrong, Mei Xurong, et al. Long-term effect of chemical fertilizer, straw, and manure on soil chemical and biological properties in northwest China[J]. *Geoderma*, 2010, 158(3): 173–180.
- [39] 潘根兴, 李恋卿, 张旭辉. 土壤有机碳库与全球变化研究的若干前沿问题[J]. *南京农业大学学报*, 2002, 25(3): 100–109. Pan Genxing, Li Lianqing, Zhang Xuhui. Perspectives on issues of soil carbon pools and global change-With suggestions for studying organic carbon sequestration in paddy soils of China[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2001, 25(3): 100–109. (in Chinese with English abstract)
- [40] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304(5677): 1623–1627.
- [41] Yan D Z, Wang D J, Yang L Z. Long-term effect of chemical fertilizer, straw, and manure on labile organic matter fractions in a paddy soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2007, 44(1): 93–101.
- [42] Liu Enke, Yan Changrong, Mei Xurong, et al. Long-term effect of manure and fertilizer on soil organic carbon pools in dryland farming in northwest China[J]. *PloS one*, 2013, 8: e56536.
- [43] Garcia-Gil J C, Plaza C, Soler-Rovira P, et al. Long-term effects of municipal solid waste compost application on soil enzyme activities and microbial biomass[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(13): 1907–1913.
- [44] Gong W, Yan X Y, Wang J Y, et al. Long-term manuring and fertilization effects on soil organic carbon pools under a wheat–maize cropping system in North China plain[J]. *Plant and Soil*, 2009, 314(1-2): 67–76.
- [45] 李新华, 郭洪海, 朱振林, 等. 不同秸秆还田模式对土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(9): 130–135. Li Xinhua, Guo Honghai, Zhu Zhenlin, et al. Effects of different straw return modes on contents of soil organic carbon and fractions of soil active carbon[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(9): 130–135. (in Chinese with English abstract)
- [46] Saha S, Prakash V, Kundu S, et al. Soil enzymatic activity as affected by long term application of farm yard manure and mineral fertilizer under a rainfed soybean–wheat system in NW Himalaya[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2008, 44(3): 309–315.
- [47] 王晓峰, 汪思龙, 张伟东. 杉木凋落物对土壤有机碳分解及微生物生物量碳的影响[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(9): 2393–2398. Wang Xiaofeng, Wang Silong, Zhang Weidong. Effects of Chinese fir litter on soil organic carbon decomposition and microbial biomass carbon[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(9): 2393–2398. (in Chinese with English abstract)
- [48] De Troyer I, Amery F, Van Moorlegheem C, et al. Tracing the source and fate of dissolved organic matter in soil after incorporation of a ^{13}C labelled residue: A batch incubation study[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(3): 513–519.
- [49] Fontaine S, Mariotti A, Abbadié L. The priming effect of organic matter: A question of microbial competition?[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(6): 837–843.
- [50] Thiessen S, Gleixner G, Wutzler T, et al. Both priming and temperature sensitivity of soil organic matter decomposition depend on microbial biomass—an incubation study[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 57: 739–748.
- [51] 李有兵, 把余玲, 李硕, 等. 作物残体与其生物炭配施对土壤有机碳及其自身矿化率的提升[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(4): 943–950. Li Youbing, Ba Yuling, Li Shuo, et al. Combined addition of crop residues and their biochar increase soil organic C content and mineralization rate[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2015, 21(4): 943–950. (in Chinese with English abstract)
- [52] Nottingham A T, Griffiths H, Chamberlain P M, et al. Soil priming by sugar and leaf-litter substrates: a link to microbial groups[J]. *Applied Soil Ecology*, 2009, 42(3): 183–190.
- [53] De Nobili M, Contin M, Mondini C, et al. Soil microbial biomass is triggered into activity by trace amounts of substrate[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(9): 1163–1170.
- [54] Falchini L, Naumova N, Kuikman P J, et al. CO_2 evolution and denaturing gradient gel electrophoresis profiles of bacterial communities in soil following addition of low molecular weight substrates to simulate root exudation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 35(6): 775–782.
- [55] Zhang Weidong, Wang Xiaofeng, Wang Silong. Addition of external organic carbon and native soil organic carbon decomposition: A meta-analysis[J]. *Plos One*, 2013, 8(2): e54779.

Effects of cattle manure addition on soil organic carbon mineralization and priming effects under long-term fertilization regimes

Qi Ruimin, Zhao Bingqiang, Li Juan^{*}, Lin Zhian, Li Yanting, Yang Xiangdong, Li Zhijie

(Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer, Ministry of Agriculture/Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The mineralization of soil organic carbon (SOC) is an important part of carbon cycle in the terrestrial ecosystem, and it is directly related to the nutrient cycling and utilization in the soil, crop productivity, greenhouse gases emission, SOC storage, and so on. It is reported that the SOC mineralization is significantly affected by the environmental factors such as different fertilization practices, the exogenous organic matter addition, and so on, and even small changes of the SOC can lead to higher impact on the dynamics of soil ecosystems. In order to reveal the effect of cattle manure addition on the SOC mineralization and the priming effects under long-term fertilization regime, an incubation experiment was conducted to investigate the effects of equal rate of cattle manure addition on the mineralization of SOC and contents of soil labile organic carbon fractions (microbial biomass carbon, MBC; dissolved organic carbon, DOC; particulate organic carbon, POC; and easily oxidizable carbon, EOC) in the long-term fertilization trials (control with no-fertilizer, CK; standard rate of organic manure treatment, SMA; standard rate of mineral fertilizer treatment, SMF; half-standard rate of organic manure plus half-standard rate of mineral fertilizer treatment, 1/2(SMA+SMF)), which were established in 1986 in Yucheng City, Shandong province, China. During incubation, soil moisture was adjusted to 60% of the field capacity with deionized water, and the fresh soil sample (equal to 100 g dry soil), adding cattle manure or not, was placed into a 500 mL wide-mouthed bottle sealed with a rubber plug and then incubated in the darkness for 79 d. The bottle plug was opened for gas exchange at regular intervals, and the soil moisture was adjusted gravimetrically with deionized water to maintain the 60% field capacity. We determined soil chemical properties and labile organic carbon fractions using the standard methods and the SOC mineralization by collecting gas at regular intervals in a 79 d incubation experiment. Additionally, we investigated the relationships between priming effects of soil organic carbon mineralization among different fertilized soils with cattle manure addition and soil nutrients with redundancy analysis (RDA). The results showed that the curve of accumulative mineralization amounts of SOC in the different fertilizer-treated soils were fitting with first-order kinetical equation, and the SOC mineralization rate constants in CK, SMF and 1/2(SMA+SMF) with cattle manure addition increased by 21.74%, 35.00% and 45.00%, respectively; and the positive priming effects in CK and SMF treatments with cattle manure addition were 48.56% and 48.43%, much higher than those in the SMA and 1/2(SMA+SMF) treatments. Moreover, cattle manure addition significantly increased the contents of SOC, MBC, POC and EOC, but significantly reduced DOC content. Redundancy analysis showed that the priming effects of SOC mineralization in long-term fertilized soils with cattle manure addition had significantly positive correlations with the C/N (carbon/nitrogen) ratio of labile fractions, but had significantly negative correlations with the soil nutrient contents (SOC; total nitrogen; available phosphorus, available potassium). In conclusion, this study is beneficial to achieve the maximum benefits of agricultural resources and apply organic fertilizer reasonably, which provides a theoretical basis for sustainable development of farmland ecosystem.

Keywords: organic carbon; chemical fertilizer; cattle manure, soil organic carbon miner; priming effects